干酒糟及其可溶物中糠氨酸含量与瘤胃降解特性和瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率的相关性研究

徐宏建　李　昕　王玉洁　韩春雷　张永根*

（东北农业大学动物科学技术学院，哈尔滨 150030）

摘　要：本试验旨在验证美拉德反应中间产物糠氨酸含量与不同程度热加工干酒糟及其可溶物（DDGS）的瘤胃降解特性及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间存在相关性并建立回归方程，并与酸性洗涤不溶蛋白质作为饲料热处理敏感指标进行比较。试验采用高效液相色谱法测定不同热处理 DDGS 中糠氨酸含量，采用尼龙袋法测定干物质和粗蛋白质瘤胃降解特性并采用改进的三步体外法测定瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率，分析两者之间相关性并建立回归方程。结果表明：1）随着加热程度的增加，DDGS 中糠氨酸和酸性洗涤不溶蛋白质含量显著增加（P＜0.05），干物质和粗蛋白质瘤胃有效降解率及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率降低，且不同处理之间存在显著差异（P＜0.05）。2）糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量均与干物质和粗蛋白质瘤胃培养可溶部分（r=-0.72 vs. -0.60；r=-0.60 vs. -0.51）、不可降解部分（r=0.96 vs. 0.84；r=0.96 vs. 0.85）、有效降解率（r=-0.62 vs. -0.51；r=-0.72 vs. -0.61）以及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率（r=-0.52 vs. -0.57）存在显著相关性（P＜0.05），并可建立回归预测方程。3）糠氨酸含量较酸性洗涤不溶蛋白质含量与瘤胃降解特性具有更高的相关性，二者与瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率、总可消化蛋白质含量之间的相关性相似，但糠氨酸含量与小肠可消化蛋白质含量具有更高相关性（r=0.67）。不同热处理 DDGS 中糠氨酸含量与瘤胃降解特性和小肠消化率存在相关关系，并可建立回归方程。糠氨酸含量较酸洗洗涤不溶蛋白质含量更适合作为评价饲料热加工程度的关键指标。

收稿日期：2018-04-25
基金项目：国家奶牛产业技术体系（CARS-36）
作者简介：徐宏建（1994-），男，黑龙江哈尔滨人，硕士研究生，从事反刍动物营养与饲料科学研究。E-mail: xuhongjian0714@163.com
*通信作者：张永根，教授，博士生导师，E-mail: zhangyonggen@sina.com

关键词：糠氨酸；瘤胃降解特性；小肠消化率；DDGS；热加工

中图分类号：　　　　　　文献标志码：　　　　　　文章编号：

干酒糟及其可溶物（DDGS）是利用玉米等谷物生产酒精的副产物，是固液分离后的滤渣和蒸发浓缩后的滤液经混合干燥而制成的饲料。如果没有对滤渣和滤液进行干燥处理则称之为湿酒精糟及其可溶物（WDGS）[1]。DDGS不仅含有较高的蛋白质，而且是一种良好的过瘤胃蛋白质饲料。随着酒精工业的发展，DDGS在畜牧业得到广泛应用，尤其在奶牛和肉牛生产中尤为突出[2]。研究表明，在DDGS加工过程中烘干温度及时间对其质量影响很大，加热导致美拉德反应发生，导致其营养成分和消化率发生极大的变异，生成不易被消化且没有营养价值的产物，而且有效赖氨酸、糖分含量明显降低，消化吸收率也降低[3]。现今，多数通过颜色、粗蛋白质（CP）和酸性洗涤纤维含量对DDGS质量进行评定，直接检测饲料中的营养成分无法真实预测饲料中营养物质在瘤胃中的降解特性以及过瘤胃蛋白质在小肠内的消化情况。因此，研究反映饲料在热加工过程中营养成分和降解消化情况变化的指标具有十分重要的意义。

评价饲料热损伤具有十分重要的意义，饲喂热损伤的玉米蛋白粉和DDGS导致饲粮消化率降低，从而使动物生长受到抑制[4]。根据报道，酸性洗涤不溶氮可以作为评价蛋白质热损伤程度的指标[5]，但是研究表明，酸性洗涤不溶氮作为热损伤蛋白质的评价指标存在许多问题，且酸性洗涤不溶氮不能定量的代表美拉德反应产物[6]。据报道，利用糠氨酸含量可以预测瘤胃非可降解蛋白质中有效赖氨酸的含量[7]。也有研究报道，DDGS中赖氨酸的小肠消化率与糠氨酸含量存在相关关系[8]。但糠氨酸含量与经不同热加工DDGS的瘤胃降解特性的相关性未见报道。在美拉德反应早期阶段，还原糖与氨基基团作用形成希夫碱，然后经Amadori重排转化为与蛋白质结合的Amadori化合物[9]，Amadori化合物是美拉德反应前期的重要前体物质，糠氨酸是由Amadori化合物经过酸化水解产生的。糠氨酸含量被广泛应用于奶制品、

食品和粮食加工行业中，是检测其加工工艺以及品质的重要指标，但是在畜牧业以及饲料加工行业中鲜有应用。本试验的目的是探究 DDGS 在加热过程中产生的糠氨酸含量与瘤胃降解特性和小肠消化率之间的相关性，并建立预测方程，并和酸性洗涤不溶蛋白质进行比较，以期为糠氨酸成为饲料检测行业的新指标及湿原料饲料的加工和利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验样品采集与处理

本试验所采取的 DDGS 采集于哈尔滨市双城区某饲料加工厂。DDGS 在实验室条件下分别在 110、120、130 ℃下烘干 0.5、1.0、1.5 h，共计 9 种不同程度热加工样品。将样品粉碎过 1 mm 网筛，用于糠氨酸含量测定和营养成分分析；将样品粉碎过 2 mm 网筛，用于瘤胃降解试验。

1.2 试验动物与饲粮

试验动物选用东北农业大学阿城实验基地的 3 头装有永久性瘤胃瘘管的健康荷斯坦奶牛(体重 600 kg 左右)进行瘤胃降解试验。试验期间每日饲喂 2 次（08:00 和 16:00），自由饮水。试验饲粮参照奶牛营养需要 NRC（2001）[10]配制，其组成及营养水平见表 1。

表 1 试验饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the experimental diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
羊草 Chinese wildrye	42.85
玉米青贮 Corn silage	15.82
玉米 Corn	13.18
麦麸 Wheat bran	3.74

糖蜜 Molasses beet	0.99
豆粕 Soybean meal	3.15
干酒糟 Dried distillers grain	5.35
棉籽粕 Cottonseed meal	2.06
玉米纤维饲料 Corn gluten feed	7.42
玉米胚芽粕 Corn germ meal	4.94
预混料 Premix1)	0.50
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels2)	
泌乳净能 NE_L/(MJ/kg)	5.44
粗蛋白质 CP	14.40
中性洗涤纤维 NDF	49.20
酸性洗涤纤维 ADF	30.60
钙 Ca	0.60
磷 P	0.40

1)每千克预混料中含有 Contained the following per kg of the premix: VA 8 000 000 IU,VD 700 000 IU,VE 10 000 IU,Fe 1 600 mg,Cu 1 500 mg,Zn 10 000 mg,Mn 3 500 mg,Se 80 mg,I 120 mg,Co 50 mg。

2)产奶净能为计算值[8],其余为实测值。NE_L was a calculated value[8], while the other nutrient levels were measured values.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 糠氨酸含量测定

样品经盐酸水解后测定 CP 含量，水解液经稀释后用高效液相色谱（HPLC）在紫外(波

长 280 nm)检测器下进行分析，外标法定量[糠氨酸标品：N-ε-(2-furoyl-methyl)-*L*-lysine]。试样水解液的制备：称取 0.2 g 试样置于密封耐热试管中，加入 8 mL 10.6 mol/L 盐酸溶液，在 110 ℃下加热水解 23 h。加热结束后将水解液过滤，滤液供测定。移取 2 mL 试样水解液，测定试样溶液中的粗蛋白质含量。移取 1 mL 试样水解液，加入 5 mL 的 6 g/L 乙酸铵溶液，过 0.22 μm 水相滤膜，滤液供上机测定。色谱参考条件：色谱柱，C18 硅胶色谱柱，250 mm×4.6 mm，5 μm 粒径，或相当；柱温，32 ℃；流动相，0.1%三氟乙酸溶液为流动相 A，甲醇为流动相 B。测定：利用流动相 A 和 B 的混合液（50:50）以 1 mL/min 的流速平衡色谱系统。然后，用初始流动相平衡系统直至基线平稳。注入 10 μL 3 mol/L 盐酸溶液，以检测溶剂的纯度。注入 10 μL 待测溶液测定糠氨酸含量。糠氨酸含量以质量分数 F 计，数值以（mg/kg CP）表示。

1.3.2　常规营养成分测定

干物质（DM）、CP、粗脂肪（EE）、粗灰分（Ash）常规营养成分含量的测定参照 AOAC 的方法[11]。中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、酸性洗涤木质素（ADL）、中性洗涤不溶蛋白质（NDICP）、酸性洗涤不溶蛋白质（ADICP）含量的测定参照 Van Soest 等[12]的方法。

1.3.3　瘤胃尼龙袋法测定干物质和粗蛋白质瘤胃降解特性

根据 Nuez-Ortín 等[13]的瘤胃降解试验方法，称取 7 g 左右粉碎后的试验样品分别放入孔径为 50 μm、大小为 10 cm×20 cm 的已知重量的尼龙袋中。每种样品 3 个重复。按照“依次投入，同时取出”的原则放入瘤胃瘘管中，分别在瘤胃中处理 0、2、4、8、12、24、36、48 h。每头牛每个时间点瘤胃中尼龙袋的数目不超过 30 个。取出后的尼龙袋(包括 0 h)放在自来水下冲洗，直至水澄清，在 65 ℃的条件下烘干 48 h 至恒重，记录残渣与尼龙袋的总重，然后粉碎过 1 mm 网筛，于封口袋中保存并测定各个时间点残渣蛋白质含量。

1.3.4　改进三步体外法测定小肠消化率

参照 Gargallo 等[14]改进三步体外法的原理和方法，称取 7 g DDGS 放入尼龙袋，经瘤胃消化 12 h 后（同一 DDGS 在同一瘘管牛中设 4 个平行，共 3 头牛），取出尼龙袋，清洗至水清后将尼龙袋放在 0.1%甲基纤维素溶液中，37 ℃水浴中振荡 30 min，取出尼龙袋并清洗干净，于 65 ℃烘箱内烘干至恒重（48 h），测定残渣样品中的粗蛋白质的含量。称取 1 g 残渣装入尼龙袋（5 cm×10 cm），将尼龙袋装入 DaisyII培养瓶中。培养瓶中为提前预热的 2 L 含有 1 g/L 胃蛋白酶（P－7000，Sigma）的 pH=1.9 的盐酸溶液。将培养瓶放在 ANKOM DaisyII体外模拟发酵培养箱，39 ℃水浴中振荡 1 h，取出尼龙袋并清洗干净，加入 2 L 预热的含有 3 g/L 胰蛋白酶（P－7545，Sigma）和 50 μg/L 百里香酚的 0.5 mol/L 磷酸盐缓冲液，并将培养瓶放在 ANKOM DaisyII体外模拟发酵培养箱，39 ℃水浴中振荡 24 h，取出尼龙袋并清洗至水清，65 ℃烘箱内烘至恒重（48 h），为模拟小肠消化后的残渣样品，测定粗蛋白质的含量。

1.4 数据分析与计算

1.4.1 瘤胃降解特性相关参数的计算

某成分瘤胃残渣剩余率（%）=100-[100×（某成分质量－残留物中某成分质量）/某成分质量]。

根据 Nuez-Ortín 等[13]提出的瘤胃动力学数学指数模型进行计算：

$R(t)=U+D\times e^{-Kd\times(t-T0)}$。

式中：$R(t)$为尼龙袋在瘤胃中滞留时间 t 后营养成分的残渣剩余率（%）；U 为瘤胃不可降解部分（%）；D 为瘤胃培养可降解部分（%）；Kd 为可降解部分的降解速率（%/h）；t 为瘤胃滞留时间（h）。

利用 SAS 程序 PROC NLIN 模块进行迭代最小二乘回归运算得到降解参数。饲料有效降解率（ED）的计算公式为:

ED（%）$=S+[(D\times Kd)/(Kp+Kd)]$。

式中:S 为瘤胃培养可溶部分（%），S=100-U-D；Kp 为瘤胃外流速率(0.06/h)。

1.4.2　瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率

瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率(dRUP)计算公式为：

$dRUP$（%）=100×[($CP_{12\ h}$－CP_{i})/$CP_{12\ h}$]。

式中：$CP_{12\ h}$ 为瘤胃发酵后降解残渣样品中粗蛋白质含量（g/kg）；CP_{i} 为模拟小肠消化后残渣样品中粗蛋白质含量（g/kg）。

小肠可消化蛋白质（IDP）含量计算公式为：

IDP（g/kg）=$RUCP^{NRC}$×$dRUP$。

式中：$RUCP^{NRC}$ 为根据 NRC（2001）模型计算的瘤胃非可降解蛋白质。

总可消化蛋白质（TDP）含量计算公式为：

TDP（g/kg）=IDP+$EDCP$。

式中：$EDCP$ 为有效降解蛋白质含量。

1.4.3　数据统计与分析

本试验数据处理采用 SAS 9.4 程序 PROC GLM 模块对糠氨酸含量、常规营养成分、瘤胃降解参数以及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率进行数据分析，P<0.05 表示差异显著，P>0.05 表示差异不显著；采用 SAS 9.4 程序 PROC CORR 模块对上述指标进行相关性分析，P<0.05 表示显著相关；采用 SAS 9.4 程序 PROC REG 模块对糠氨酸含量与瘤胃降解参数以及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率进行线性回归分析。

2　结　果

2.1　不同程度热加工 DDGS 对糠氨酸含量及常规营养成分的影响

如表 2 所示，随着加热程度的增加，糠氨酸含量显著增加（P＜0.05），其变化范围为 1.16～8.10 g/kg CP。中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和酸性洗涤木质素含量也随着加热程度的增加而增加，且变化显著（P＜0.05），其变化范围分别为 38.89%～47.22% DM、10.35%～

14.29% DM、0.71%～1.63% DM。随着加热程度的增加，粗蛋白质含量没有显著变化（$P>0.05$），但是中性洗涤不溶蛋白质和酸性洗涤不溶蛋白质含量逐渐升高，且变化显著（$P<0.05$），其变化范围分别为 8.09%～16.67% CP、0.93%～3.67% CP。

表 2　不同程度热加工 DDGS 对糠氨酸含量及常规营养成分的影响

Table 2　Effects of different degrees of heat processing DDGS on furosine content and routine nutritional compositions

项目 Items	110 ℃			120 ℃			130 ℃			SEM	*P* 值
	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h		*P*-value
糠氨酸 Furosine/(g/kg CP)	1.16^{h}	2.40^{g}	3.44^{f}	2.42^{g}	4.68^{e}	6.18^{d}	6.56^{c}	7.57^{b}	8.10^{a}	44.7	<0.000 1
干物质 DM/% DM	86.1^{e}	91.4^{d}	92.7^{bc}	84.0^{f}	91.5^{d}	93.47^{b}	91.83^{cd}	92.48^{c}	94.46^{a}	0.28	<0.000 1
有机物 OM/% DM	78.22^{d}	83.60^{c}	84.43^{c}	76.46^{e}	83.62^{c}	85.57^{b}	83.97^{c}	84.47^{c}	86.49^{a}	0.28	<0.000 1
粗灰分 Ash/% DM	7.84^{d}	7.79^{d}	8.21^{a}	7.51^{e}	7.83^{d}	7.89^{cd}	7.85^{d}	8.00^{b}	7.96^{bc}	0.03	<0.000 1
粗脂肪 EE/% DM	8.20^{ab}	8.56^{a}	8.65^{a}	8.68^{a}	8.85^{a}	7.95^{ab}	8.08^{ab}	8.34^{a}	7.39^{ab}	0.27	0.03
粗蛋白质 CP/% DM	27.47	2.82	28.72	26.93	28.46	28.21	27.71	28.72	27.93	0.14	0.08
中性洗涤纤维 NDF/% DM	39.87^{d}	40.21^{d}	42.05^{c}	38.89^{e}	41.74^{c}	42.80^{b}	43.13^{b}	43.29^{b}	47.22^{a}	0.25	<0.000 1
酸性洗涤纤维 ADF/% DM	11.65^{c}	10.36^{d}	11.27^{c}	10.35^{d}	11.23^{c}	13.19^{b}	13.12^{b}	13.22^{b}	14.29^{a}	0.16	<0.000 1
酸性洗涤木质素 ADL/% DM	0.88^{de}	1.16^{bc}	0.86^{de}	0.71^{e}	0.94^{d}	1.03^{cd}	1.30^{b}	1.28^{b}	1.63^{a}	0.07	<0.000 1

中性洗涤不溶蛋白质 NDICP/% CP	8.09[g]	8.67[f]	9.48[e]	9.08[ef]	10.73[cd]	11.11[bc]	10.40[d]	11.37[b]	16.67[a]	0.19	<0.000 1
酸性洗涤不溶蛋白质 ADICP/% CP	0.93[e]	1.36[d]	1.44[cd]	1.44[cd]	1.67[c]	1.72[c]	1.57[cd]	2.54[b]	3.67[a]	0.09	<0.000 1

同行数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05)，相同或无字母表示差异不显著(P>0.05)。表 3、表 4 同。

Values with different letter superscripts in the same row mean significant difference (P<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as Tables 3 and 4.

2.2　不同程度热加工 DDGS 对干物质和粗蛋白质瘤胃降解特性的影响

如表 3 所示，经不同程度热加工的 DDGS 干物质瘤胃培养可溶部分的变化范围为 5.54%～16.00%，干物质瘤胃培养不可溶但可降解部分的变化范围为 80.52%～87.95%，干物质瘤胃可降解部分降解率变化范围为 2.6～3.8 %/h，干物质瘤胃不可降解部分的变化范围为 0.84%～8.50%，干物质瘤胃有效降解率的变化范围为 31.1%～46.8%。随着加热程度的增加，干物质瘤胃有效降解率逐渐降低，干物质瘤胃不可降解部分则逐渐升高，干物质瘤胃培养可降解部分和干物质瘤胃可降解部分降解率没有呈现规律的变化趋势。经不同程度热加工 DDGS 粗蛋白质瘤胃培养可溶部分的变化范围为 12.89%～28.23%，粗蛋白质瘤胃培养不可溶但可降解部分的变化范围为 68.04%～81.21%，粗蛋白质瘤胃可降解部分降解率变化范围为 3.1～4.5 %/h，粗蛋白质瘤胃不可降解部分的变化范围为 0.72%～7.84%，粗蛋白质瘤胃有效降解率的变化范围为 40.7%～57.8%。随着加热程度的逐渐增加，粗蛋白质瘤胃培养可溶部分和粗蛋白质瘤胃有效降解率逐渐降低，粗蛋白质瘤胃不可降解部分则逐渐升高，且变化显著（$P<0.05$），而粗蛋白质瘤胃培养不可溶但可降解部分和粗蛋白质瘤胃可降解部分降解率虽然变化显著（$P<0.05$），但没有呈现规律的变化。

表 3　不同程度热加工 DDGS 对干物质和粗蛋白质瘤胃降解特性的影响

Table 3　Effects of different degrees of heat processing DDGS on rumen degradation characteristics of DM and CP

项目 Items	110 ℃			120 ℃			130 ℃			SEM	*P* 值 *P*-value
	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h		
干物质瘤胃降解参数 Rumen degradation parameters of DM											
干物质瘤胃培养可溶部分 DM_S/%	15.63[a]	14.38[ab]	14.25[ab]	16.00[a]	13.20[ab]	6.43[c]	12.05[b]	12.47[b]	5.54[c]	9.42	<0.000 1
干物质瘤胃培养不可溶但可降解部分 DM_D/%	83.53[bcd]	83.90[bc]	83.18b[cde]	80.63[de]	82.46[cde]	87.95[a]	81.79[cde]	80.52[e]	85.96[ab]	9.00	0.000 3
干物质瘤胃不可降解部分 DM_U/%	0.84[i]	1.71[h]	2.57[g]	3.36[f]	4.34[e]	5.61[d]	6.16[c]	7.00[b]	8.50[a]	0.49	<0.000 1
干物质瘤胃可降解部分降解率 DM_{Kd}/(%/h)	3.1[ab]	3.2[ab]	3.2[ab]	3.8[a]	3.5[ab]	2.6[b]	3.4[b]	3.2[ab]	2.6[b]	0.29	0.15
干物质瘤胃有效降解率 EDDM/%	44.1[a]	43.6[a]	43.3[a]	46.8[a]	43.3[a]	33.6[bc]	41.3[a]	40.1[ab]	31.1[c]	2.20	0.001
粗蛋白质瘤胃降解参数 Rumen degradation parameters of CP											

粗蛋白质瘤胃培养可溶部分 CP_S/%	28.16[a]	28.23[a]	28.21[a]	27.45[a]	26.34[a]	13.61[b]	23.60[a]	26.04[a]	12.89[b]	1.57	<0.000 1
粗蛋白质瘤胃培养不可溶但可降解部分 CP_D/%	71.12[b]	70.33[b]	69.63[b]	69.64[b]	69.97[b]	81.21[a]	71.05[b]	68.04[b]	79.27[a]	15.00	<0.000 1
粗蛋白质瘤胃不可降解部分 CP_U/%	0.72[h]	1.44[g]	2.15[f]	2.90[e]	3.68[d]	5.18[c]	5.35[c]	5.92[b]	7.84[a]	0.85	<0.000 1
粗蛋白质瘤胃可降解部分降解率 CP_{Kd}/(%/h)	4.1	4.5	4.3	4.5	4.1	3.6	4.0	3.4	3.1	0.54	0.23
粗蛋白质瘤胃有效降解率 EDCP/%	58.0[ab]	58.5[a]	57.7[ab]	57.8[ab]	55.6[ab]	44.2[c]	52.8[b]	53.1[b]	40.7[c]	1.59	<0.000 1

2.3　不同程度热加工 DDGS 对瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率的影响

如表 4 所示，不同程度热加工显著影响瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和小肠可消化蛋白质以及总可消化蛋白质的含量（$P<0.05$）。不同热处理 DDGS 中瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率的变化范围为 90.05%～93.83%，小肠可消化蛋白质的变化范围为 38.6%～53.5% CP，总可消化蛋白质的变化范围为 94.1%～97.6% CP。随着加热程度的增加，瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白质含量逐渐降低，小肠可消化蛋白质含量逐渐升高，且变化显著（$P<0.05$）。

表 4　不同程度热加工 DDGS 对瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率的影响

Table 4　Effects of different degrees of heat processing DDGS on intestinal digestibility of rumen undegraded protein

项目 Items	110 ℃			120 ℃			130 ℃			SEM	P 值 P-value
	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h		
瘤胃降解部分 Rumen degradation part											
瘤胃非降解蛋白质 RUP[DVE]	128.4[d]	129.7[cd]	134.5b[cd]	126.8[d]	139.2[bcd]	173.1[a]	144.6[bc]	150.1[b]	183.2[a]	4.91	<0.000 1
瘤胃非降解蛋白质 RUP[NRC]	115.7[d]	116.8[cd]	121.2[cd]	114.2[d]	125.4[bcd]	156.0[a]	130.3[bc]	135.2[b]	165.0[a]	4.43	<0.000 1
有效降解蛋白质 EDCP	159.5[ab]	164.6[a]	165.2[ab]	156.3[ab]	157.3[ab]	123.7[c]	145.8[b]	153.3[b]	113.1[c]	4.43	<0.000 1
小肠降解部分 Small intestine degradation part											
瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率 dRUP/%	93.83[a]	93.19[ab]	92.69[abc]	92.73[abc]	92.04[abc]	90.05[bc]	93.21[ab]	91.90[abc]	90.51[c]	5.95	0.007
小肠可消化蛋白质 IDP/% CP	39.5[b]	38.6[b]	39.1[b]	39.3[b]	40.6[b]	50.3[a]	43.8[b]	43.3[b]	53.5[a]	1.85	0.000 1

小肠可消化蛋白质 IDP/(g/kg DM)	108.6^{bc}	108.9^{bc}	112.4^{bc}	106.0^{c}	115.5^{bc}	141.9^{a}	121.5^{bc}	124.3^{b}	149.4^{a}	4.95	<0.000 1
总可消化蛋白质 TDP/% CP	97.6^{a}	96.9^{a}	96.6^{a}	97.4^{a}	95.8^{ab}	94.1^{b}	96.5^{a}	96.6^{a}	94.0^{b}	0.63	0.005
总可消化蛋白质 TDP/(g/kg DM)	268.1^{c}	273.5^{b}	277.5^{a}	262.2^{e}	272.8^{b}	265.6^{d}	267.3^{cd}	277.6^{a}	262.5^{e}	0.66	<0.000 1

RUCP^{NRC}：根据 NRC(2001)模型计算的瘤胃非降解蛋白质；RUCP^{DVE}：根据 DVE/OEB 体系计算的瘤胃非降解蛋白质。表 7、表 8 同。

RUP^{NRC}: rumen undegradable protein in the NRC (2001) model; RUP^{DVE}: rumen undegradable protein based on DVE/OEB system. The same as Tables 7 and 8.

2.4　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和干物质与粗蛋白质瘤胃降解特性之间的相关性

如表 5 所示，在干物质降解特性中的，糠氨酸含量与干物质瘤胃培养可溶部分以及干物质瘤胃有效降解率存在显著负相关（r=-0.72，P<0.05；r=-0.62，P<0.05），糠氨酸含量与干物质瘤胃不可降解部分存在显著正相关（r=0.96，P<0.05）。在粗蛋白质瘤胃降解特性中，糠氨酸含量与粗蛋白质瘤胃培养可溶部分、粗蛋白质瘤胃可降解部分降解速率及粗蛋白质瘤胃有效降解率存在显著负相关（r=-0.60，P<0.05；r=-0.62，P<0.05；r=-0.72，P<0.05），而与粗蛋白质瘤胃不可降解部分存在显著正相关（r=0.96，P<0.05）。酸性洗涤不溶蛋白质含量与干物质瘤胃降解特性中的干物质瘤胃培养可溶部分及干物质瘤胃有效降解率存在显著负相关（r=-0.60，P<0.05；r=-0.51，P<0.05），与干物质瘤胃不可降解部分存在显著正相关（r=0.84，P<0.05）。酸性洗涤不溶蛋白质与粗蛋白质瘤胃降解特性中的粗蛋白质瘤胃培养可溶部分、粗蛋白质瘤胃可降解部分降解速率及粗蛋白瘤胃有效降解率存在显著负相关（r=-0.51，P<0.05；r=-0.51，P<0.05；r=-0.61，P<0.05），与粗蛋白质瘤胃不可降解部分存在显著正相关（r=0.85，P<0.05）。

表 5　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和干物质与粗蛋白质瘤胃降解特性之间的相关性

Table 5　Correlation between furosine and ADICP contents and rumen degradation characteristics of DM and CP in DDGS with different degrees of heat processing

项目 Items		干物质瘤胃培养可溶部分 DM_S	干物质瘤胃培养不可溶但可降解部分 DM_D	干物质瘤胃可降解部分降解率 DM_{Kd}	干物质瘤胃不可降解部分 DM_U	干物质瘤胃有效降解率 EDDM	粗蛋白质瘤胃培养可溶部分 CP_S	粗蛋白质瘤胃培养不可溶但可降解部分 CP_D	粗蛋白质瘤胃可降解部分降解率 CP_{Kd}	粗蛋白质瘤胃不可降解部分 CP_U	粗蛋白质瘤胃有效降解率 EDCP
糠氨酸 Furosine	*r*	-0.72	0.09	-0.34	0.96	-0.62	-0.60	0.24	-0.62	0.96	-0.72
	P 值	<0.000 1	0.67	0.08	<0.000 1	0.000 6	0.001	0.24	0.000 5	<0.000 1	<0.000 1
酸性洗涤不溶蛋白质 ADICP	*r*	-0.60	0.05	-0.31	0.84	-0.51	-0.51	0.19	-0.51	0.85	-0.61
	P 值	0.000 9	0.79	0.12	<0.000 1	0.01	0.01	0.35	0.01	<0.000 1	0.000 7

2.5　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间的相关性

如表 6 所示，糠氨酸含量与 DVE 和 NRC 模型预测的瘤胃非降解蛋白质存在显著的正相关性（r=0.77，P＜0.05；r=0.77，P＜0.05），并且相关系数均高于与酸性洗涤不溶蛋白质的相关系数（r=0.68，P＜0.05；r=0.68，P＜0.05）。瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白质（% CP）均与糠氨酸和中性洗涤不溶蛋白质含量存在显著负相关，与糠氨酸的相关系数（r=-0.52，P＜0.05；r=-0.60，P＜0.05）均略低于与酸性洗涤不溶蛋白质含量的相关系数（r=-0.57，P＜0.05；r=-0.63，P＜0.05）。小肠可消化蛋白质（% CP）与糠氨酸和中性洗涤不溶蛋白质含量存在显著相关性，与糠氨酸含量的相关系数（r=0.72，P＜0.05）高于与中性洗涤不溶蛋白质含量的相关系数（r=0.61，P＜0.05）。

表 6　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间的相关性

Table 6　Correlation between furosine and ADICP contents and intestinal digestibility of rumen undegraded protein in DDGS with different degrees of heat processing

项目 Items		瘤胃非降解蛋白质 RUP^{DVE}	瘤胃非降解蛋白质 RUP^{NRC}	有效降解蛋白质 EDCP	瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率 dRUP	小肠可消化蛋白质 IDP (% CP)	小肠可消化蛋白质 IDP(g/kg)	总可消化蛋白质 TDP (% CP)	总可消化蛋白质 TDP (g/kg)
糠氨酸 Furosine	*r*	0.77	0.77	-0.62	-0.52	0.67	0.72	-0.60	-0.07
	P 值	<0.000 1	<0.000 1	0.000 5	0.005	0.000 1	<0.000 1	0.000 9	0.74
酸性洗涤不溶蛋白质 ADICP	*r*	0.68	0.68	-0.51	-0.57	0.52	0.61	-0.63	-0.07
	P 值	<0.000 1	<0.000 1	0.007	0.002	0.005	0.000 7	0.000 4	0.73

2.6 不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别与瘤胃降解特性及瘤胃非降解蛋白质小肠消化率之间的回归关系

如表 7、表 8 所示，糠氨酸含量较酸性洗涤不溶蛋白质含量更能准确地预测干物质和粗蛋白质的瘤胃培养可溶部分、瘤胃不可降解部分、瘤胃有效降解率和小肠可消化蛋白质（% CP）含量，而糠氨酸和酸性洗涤不溶蛋白质含量预测瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白质（% CP）的方程拟合程度相似。其中糠氨酸含量可以有效预测干物质瘤胃培养不可溶但可降解部分和蛋白质瘤胃不可降解部分（R^2=0.95、R^2=0.93）。

表 7 不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸含量与瘤胃降解特性及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间的回归关系

Table 7 Linear regression between furosine content and rumen degradation characteristic and intestinal digestibility of rumen undegraded protein in DDGS with different degrees of heat processing

预测变量 Predicted variables (*Y*)	回归方程 Prediction equations (*Y*=a+b*x*)	决定系数 R^2	残差 RSD	*P* 值 *P*-value
瘤胃降解特性 Rumen degradation characteristic				
干物质瘤胃培养可溶部分 DM_S	*Y*=178.082 36-11.837×*Furosine*	0.54	1.11	<0.000 1
干物质瘤胃培养不可溶但可降解部分 DM_U	*Y*=-2.515 72+9.969×*Furosine*	0.95	0.44	<0.000 1
干物质瘤胃有效降解率 EDDM	*Y*=48.409 94-1.599×*Furosine*	0.42	7.16	0.000 2
粗蛋白质瘤胃培养可溶部分 CP_S	*Y*=319.552 24-17.188×*Furosine*	0.42	0.32	0.000 2
粗蛋白质瘤胃不可降解部分 CP_U	*Y*=-3.551 04+9.030×*Furosine*	0.93	0.21	<0.000 1

粗蛋白质瘤胃有效降解率 EDCP	Y=62.807 43-2.044×*Furosine*	0.55	0.21	<0.000 1
瘤胃不可降解蛋白质 RUP^{DVE}	Y=113.876 14+6.697×*Furosine*	0.61	2.16	<0.000 1
瘤胃不可降解蛋白质 RUP^{NRC}	Y=102.591 11+6.033×*Furosine*	0.61	0.35	<0.000 1
粗蛋白质瘤胃有效降解率 EDCP	Y=173.679 19-5.278×*Furosine*	0.46	1.74	0.000 1
小肠消化特性 Intestinal digestion characteristics				
瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率 dRUP	Y=93.884-0.326×*Furosine*	0.29	1.41	0.004
小肠可消化蛋白质 IDP（% CP）	Y=35.104 33+1.698×*Furosine*	0.49	0.21	<0.000 1
小肠可消化蛋白质 IDP (g/kg DM)	Y=96.777 96+5.117×*Furosine*	0.56	1.98	<0.000 1
总可消化蛋白质 TDP（% CP）	Y=97.904 31-0.367×*Furosine*	0.33	1.58	0.002

表 8　不同程度热加工 DDGS 中酸性洗涤不溶蛋白质含量与瘤胃降解特性及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间的回归关系

Table 8　Linear regression between ADICP content and rumen degradation characteristic and intestinal digestibility of rumen undegraded protein in DDGS with different degrees of heat processing

预测变量 Predicted variables (Y)	回归方程 Prediction equations (Y=a+bx)	决定系数 R^2	残差 RSD	P 值 P-value
瘤胃降解特性 Rumen degradation characteristic				
干物质瘤胃培养可溶部分 DM_S	Y=17.877 83-3.000 60×*ADICP*	0.38	0.97	0.000 6
干物质瘤胃培养不可溶但可降解部分 DM_U	Y=-0.369 64+0.09 969×*ADICP*	0.68	0.20	<0.000 1
干物质瘤胃有效降解率 EDDM	Y=48.681 25-4.146 70×*ADICP*	0.31	2.50	0.003

粗蛋白质瘤胃培养可溶部分 CP_S	Y=32.038 82-4.347 97×$ADICP$	0.29	3.00	0.003
粗蛋白质瘤胃不可降解部分 CP_U	Y=-0.508 14+2.342 01×$ADICP$	0.68	0.16	<0.000 1
粗蛋白质瘤胃有效降解率 EDCP	Y= 63.329 52-5.394 05×$ADICP$	0.42	2.66	0.000 3
瘤胃不可降解蛋白质 RUP^{DVE}	Y=112.293 52+17.607 14×$ADICP$	0.46	2.40	0.000 1
瘤胃不可降解蛋白质 RUP^{NRC}	Y=101.165 34+15.862 29×$ADICP$	0.46	1.95	0.000 1
蛋白质瘤胃有效降解率 EDCP	Y=175.125 74-13.983 01×$ADICP$	0.35	2.73	0.000 1
小肠消化特性 Intestinal digestion characteristics				
瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率 dRUP	Y=94.393-1.088×$ADICP$	0.35	0.14	0.001
小肠可消化蛋白质 IDP (% CP)	Y=34.901 51+4.358 99×$ADICP$	0.36	2.26	0.001
小肠可消化蛋白质 IDP (g/kg DM)	Y=96.238 70+13.097 02×$ADICP$	0.40	1.69	0.000 4
总可消化蛋白质 TDP (% CP)	Y=98.237 09-1.095 09×$ADICP$	0.32	1.69	0.002

3 讨 论

3.1 不同程度热加工对 DDGS 中糠氨酸含量及常规营养成分的影响

美拉德反应广泛存在于食品和饲料加工的过程中，对其气味、口感、营养价值有很大的影响。据报道，在奶制品和DDGS中美拉德反应中间产物Amadori经过酸化水解后产生恒定比例的糠氨酸[8,15]，所以美拉德反应的程度可以通过糠氨酸含量间接衡量。在奶制品和食品加工的制作过程中，更高的温度和更长的加热时间会使糠氨酸含量增加，本试验中糠氨酸含量也随热加工程度的增加而升高[16-17]。随着加热程度增加也对一些营养成分产生影响，热加工会增加饲料中的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的含量[18]。而且在的Van Soest[19]的报道中，加热也会增加牧草中木质素的含量，本试验也证明了加热后酸性洗涤木质素含量显著增加。根据Mckinnon等[18]的研究，加热对粗蛋白质含量没有影响，而在Zhang等[20]研究中发现不同热处理对DDGS的粗蛋白质含量影响很小，但对蛋白质二级结构影响很大，从而影响蛋白质的瘤胃降解和小肠消化特性。本试验中粗蛋白质含量的变化范围也很小，而且没有随着加热

程度的增加呈现出明显的变化趋势，但是热加工影响中性洗涤不溶蛋白质和酸性洗涤不溶蛋白质含量，且随着加热程度的增加显著升高。

3.2　不同程度热加工 DDGS 对干物质和蛋白质瘤胃降解特性的影响

根据报道，不同加热程度会影响干物质和粗蛋白质的瘤胃降解特性[18,21]。热处理能够改变营养物质组分，进而改变营养物质的瘤胃降解特性和有效降解率。研究表明，随着加热程度的增加使干物质和粗蛋白质的 12 和 24 h 消失率逐渐降低[21]。在热处理全棉籽的研究中，加热也会降低干物质和粗蛋白质的瘤胃有效降解率[22]，与本试验的结果一致。干物质瘤胃培养可溶部分由可溶性蛋白质、可溶性碳水化合物等可溶性营养物质组成，在加热过程中美拉德反应使部分可溶性物质发生转化，使得可溶部分转化成不溶但可降解部分和瘤胃不可降解部分。蛋白质瘤胃不可降解部分与热损伤蛋白质含量有关，加热程度越剧烈对蛋白质的损伤程度越高，而这些损伤的蛋白质大多则是不可消化且没有营养价值的。所以热处理对饲料的瘤胃降解特性的影响是十分重要的，评价热处理不仅能体现出饲料加工的优劣，还可以反映出饲料中营养物质的损伤程度。

3.3　不同程度热加工 DDGS 对瘤胃非降解蛋白的小肠消化率的影响

不仅原料种类影响 DDGS 中蛋白质小肠消化率，加工工艺以及加热的方式和程度也对蛋白质在小肠中的消化和吸收产生影响[23]。本试验中 DDGS 瘤胃非解蛋白质的小肠消化率与前人研究结果相似。本试验结果得出在一定范围内加热程度越高瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率越低，与前人研究结果[18]一致。在本试验的加热范围内，加热程度越高，小肠可消化蛋白质含量逐渐增加，总可吸收蛋白质含量逐渐减少。由于加热程度增加使蛋白质有效降解率减小，导致过瘤胃非降解蛋白质含量增加，而且瘤胃非可降解蛋白质的小肠消化率减少幅度很小，导致在小肠消化的蛋白质增多。增加小肠可消化蛋白质含量可以提高泌乳牛产奶量，这可能与蛋白质供应和能量代谢的交互作用有关。研究表明，过热加工会降低蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白质含量[18]，与本试验结果一致。

3.4　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和干物质与粗蛋白质瘤胃降解特性之间的相关性

饲料中的蛋白质和纤维通过氨基酰基反应或者美拉德反应生成不易被消化的蛋白质，这些蛋白质称为酸性洗涤不溶氮（蛋白质）和中性洗涤不溶氮（蛋白质）。但是酸性洗涤不溶氮作为评价蛋白质热损伤程度的指标存在许多问题[6]。热加工导致美拉德反应的发生和营养成分的热损伤，进而导致干物质有效降解率的降低[13]。大量的研究证明，无论在粗饲料还是加工副产物中酸性洗涤不溶蛋白质与粗蛋白质瘤胃降解率存在负相关[5,24-25]。本试验结果表明，酸性洗涤不溶蛋白质含量与干物质和粗蛋白质有效降解率存在负相关，而糠氨酸含量与干物质和粗蛋白质有效降解率存在较高的负相关。在一定范围内的加热过程中发生的美拉德反应使饲料瘤胃培养可溶部分中的可溶性真蛋白质和可溶性碳水化合物等的含量减少，同时使瘤胃不可降解部分饲料中酸性洗涤不溶蛋白质和木质素等的含量增加。本试验中酸性洗涤不溶蛋白质含量和干物质和粗蛋白质瘤胃培养可溶部分存在负相关，而糠氨酸含量与其则存在较高的相关性。酸性洗涤不溶蛋白质与干物质和粗蛋白质瘤胃不可降解部分存在较高的正相关关系，而糠氨酸含量与其存在更高的相关关系。这说明糠氨酸含量较酸性洗涤不溶蛋白质含量更能反映出美拉德反应程度，可以成为一种更稳定、准确的方法来评价不同热处理 DDGS 的干物质和瘤胃降解特性中的瘤胃培养可溶性部分和不可降解部分和瘤胃有效降解率。

3.5　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间的相关性

热加工对蛋白质小肠消化率的影响可以用酸性洗涤不溶氮含量来评价[5]。移动尼龙袋法可以研究瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率[26]，本试验采用改进的体外三步法测定瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率。根据研究，蛋白质在小肠和全消化道的消失率和酸性洗涤不溶氮含量存在负相关[19]。Moshtaghi 等[27]也报道，酸性洗涤不溶氮与全消化道的总可消化蛋白质含

量（% CP）存在负相关关系。本试验也证明了酸性洗涤不容蛋白质含量与瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白质含量（% CP）存在负相关关系。在 Boucher 等[7]的赖氨酸小肠消化率的研究中，美拉德反应早期产物糠氨酸越多，赖氨酸的小肠消化率就越低。糠氨酸与瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白含量（% CP）也存在负相关关系，但是糠氨酸含量与二者的相关性和酸性洗涤不溶蛋白质含量与二者之间的相关性差别不大。这说明酸性洗涤不溶蛋白质和糠氨酸含量均可以对瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率和总可消化蛋白质含量（% CP）进行预测。但是糠氨酸含量与小肠可消化蛋白质含量（% CP）较酸性洗涤不溶蛋白质含量与小肠可消化蛋白质含量（% CP）有更高的相关性。也就是说，可以利用糠氨酸含量更好地预测小肠可消化蛋白质含量（% CP），这一结果为建立回归方程提供了理论依据。

3.6　不同程度热加工 DDGS 中糠氨酸与酸性洗涤不溶蛋白质含量分别和瘤胃降解特性及瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率之间的回归关系

目前尚未发现糠氨酸含量与瘤胃降解特性之间的相关性研究。在本试验中，糠氨酸含量与干物质和粗蛋白质瘤胃不可降解部分的拟合程度最好，R^2 分别为 0.95 和 0.93。糠氨酸含量与瘤胃降解特性的拟合程度均高于酸性洗涤不溶蛋白质。在 Pahm 等[8]的研究中瘤胃非降解蛋白质中糠氨酸的含量与不同 DDGS 中有效赖氨酸的含量均存在相关关系。Boucher 等[7]研究表明糠氨酸含量可以预测 DDGS 中瘤胃非降解蛋白质中赖氨酸的小肠消化率。Mckinnon 等[18]研究得出酸性洗涤不溶氮预测蛋白质在小肠和全消化道的降解情况，R^2 分别为 0.78 和 0.82。本试验中糠氨酸和酸性洗涤不溶蛋白质含量与小肠消化率和总可消化蛋白质含量（% CP）的拟合程度相似，但是糠氨酸含量与小肠可降解蛋白质含量（% CP）的拟合程度要高于酸性洗涤不溶蛋白质含量。本试验中利用糠氨酸含量可以预测瘤胃降解特性和小肠消化特性的研究还在初始阶段，其他预测方程的拟合程度不高的原因可能是研究对象还不够广泛和深入，尚需要大量的试验来建立更精确的预测方程。

4 结 论

① 经过不同热处理得到的 DDGS 中糠氨酸含量、常规营养成分含量、瘤胃降解特性和小肠消化率差异显著。

② 糠氨酸和酸性洗涤不溶蛋白质含量分别与瘤胃降解特性和小肠消化率存在相关关系，而且可以利用糠氨酸和酸性洗涤不溶蛋白质含量分别建立回归方程，预测瘤胃降解特性和小肠消化率。

③ 糠氨酸含量比酸性洗涤不溶蛋白质含量更加准确地预测干物质和粗蛋白质瘤胃可溶性部分、不可降解部分、有效降解率和小肠可消化蛋白质含量。本试验初步验证了糠氨酸含量可以作为评价饲料热加工程度及鉴定热加工湿饲料品质及消化特性的新型指标。

参考文献：

[1] 曹志军, 李胜利.玉米干酒糟及其可溶物(DDGS)在奶牛日粮中的应用[J].中国奶牛, 2009(10):20－22.

[2] 申军士, 王加启, 王晶, 等. DDGS 的营养特性及其在奶牛日粮中的应用[J]. 中国饲料, 2008(9):37–40.

[3] 王继强, 龙强,李爱琴,等.常见大宗饲料原料的质量控制[J]. 广东饲料,2008(5):40–42.

[4] NAKAMURA T,KLOPFENSTEIN T J,GIBB D J,et al.Growth efficiency and digestibility of heated protein fed to growing ruminants[J].Journal of Animal Science,1994,72(3):774–782.

[5] GOERING H K,GORDON C H,HEMKEN R W,et al.Analytical estimates of nitrogen digestibility in heat damaged forages[J].Journal of Dairy Science,1972,55(9):1275–1280.

[6] VAN SOEST P J,MASON V C.The influence of the Maillard reaction upon the nutritive value of fibrous feeds[J].Animal Feed Science and Technology,1991,32(1/2/3):45－53.

[7] BOUCHER S E,PEDERSEN C,STEIN H H,et al.Evaluation of the furosine and

homoarginine methods for determining reactive lysine in rumen-undegraded protein[J].Journal of Dairy Science,2009,92(8):3951－3958.

[8] PAHM A A,PEDERSEN C,STEIN H H.Application of the reactive lysine procedure to estimate lysine digestibility in distillers dried grains with solubles fed to growing pigs[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2008,56(20):9441－9446.

[9] 乔煦玮,王振华,曾里,等.温度与复原度对巴氏杀菌乳中糠氨酸含量影响的研究[J]. 食品工业,2011,32(3):17–19.

[10] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[M].7th ed.Washington D.C.:National Academies Press,2001.

[11] LEE M H.Official methods of analysis of AOAC international (16th edn)[J].Trends in Food Science & Technology,1995,6(11):382.

[12] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A.Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber,and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(10):3583–3597.

[13] NUEZ-ORTÍN W G,YU P Q.Estimation of ruminal and intestinal digestion profiles,hourly effective degradation ratio and potential N to energy synchronization of co-products from bioethanol processing[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2010,90(12):2058–2067.

[14] GARGALLO S,CALSAMIGLIA S,FERRET A.Technical note:a modified three-step *in vitro* procedure to determine intestinal digestion of proteins[J].Journal of Animal Science,2006,84(8):2163－2167.

[15] FINOT P A,DEUTSCH R,BUJARD E.Extent of the Maillard reaction during the processing of milk[M]//ERIKSSON C.Progress in Food and Nutrition Science.Maillard

Reactions in Food.Oxford:Pergamon Press,1981.

[16] RAMÍREZ-JIMÉNEZ A,GUERRA-HERNÁNDEZ E,GARCÍA-VILLANOVA B.Browning indicators in bread[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2000,48(9):4176–4181.

[17] RADA-MENDOZA M,OLANO A,VILLAMIEL M.Furosine as indicator of Maillard reaction in jams and fruit-based infant foods[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2002,50(14):4141 – 4145.

[18] MCKINNON J J,OLUBOBOKUN J A,MUSTAFA A,et al.Influence of dry heat treatment of canola meal on site and extent of nutrient disappearance in ruminants[J].Animal Feed Science and Technology,1995,56(3/4):243–252.

[19] VAN SOEST P J.Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II .A rapid method for the determination of fiber and lignin[J].Journal Association of Official Analytical Chemists,1963,49:829-835.

[20] ZHANG X W,BELTRANENA E,CHRISTENSEN C,et al.Use of a dry fractionation process to manipulate the chemical profile and nutrient supply of a coproduct from bioethanol processing[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2012,60(27):6846–6854.

[21] MCKINNON J J,OLUBOBOKUN J A,CHRISTENSEN D A,et al.The influence of heat and chemical treatment on ruminal disappearance of canola meal[J].Canadian Journal of Animal Science,1991,71(3):773–780.

[22] ARIELI A,BEN-MOSHE A,ZAMWEL S,et al.*In situ* evaluation of the ruminal and intestinal digestibility of heat-treated whole cottonseeds[J].Journal of Dairy Science,1989,72(5):1228–1233.

[23] CHRENKOVÁ M,ČEREŠŇÁKOVÁ Z,FORMELOVÁ Z,et al.Chemical and nutritional characteristics of different types of DDGS for ruminants[J].Journal of Animal and Feed Sciences,2012,21(3):425–435.

[24] YU Y,THOMAS J W.Estimation of the extent of heat damage in alfalfa haylage by laboratory measurement[J].Journal of Animal Science,1976,42(3):766–774.

[25] NAKAMURA T,KLOPFENSTEIN T J,BRITTON R A.Evaluation of acid detergent insoluble nitrogen as an indicator of protein quality in nonforage proteins[J].Journal of Animal Science,1994,72(4):1043－1048.

[26] DE BOER G,MURPHY J J,KENNELLY J J.Mobile nylon bag for estimating intestinal availability of rumen undegradable protein[J].Journal of Dairy Science,1987,70(5):977–982.

[27] MOSHTAGHI NIA S A,INGALLS J R.Effect of heating on canola meal protein degradation in the rumen and digestion in the lower gastrointestinal tract of steers[J].Canadian Journal of Animal Science,1992,72(1):83–88.

Correlation Research between Furosine Content and Ruminal Degradation Characteristics and Intestinal Digestibility of Rumen Undegraded Protein in Distillers Dried Grains with Soluble

XU Hongjian LI Xin WANG Yujie HAN Chunlei ZHANG Yonggen*

(*College of Animal Science and Technology of Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*)

Abstract: The aim of this experiment was to verify the correlation between the furosine content of Maillard reaction intermediates and the rumen degradation characteristic, intestinal digestibility of rumen undegraded protein of distillers dried grains with soluble (DDGS) with different degrees of heat processing, to establish regression equations, and to compare with the acid detergent insoluble protein as a sensitive index for heat treatment of feeds. In this study, high-performance

liquid chromatography was used to determine furosine content, nylon bag method was used to determine the rumen degradation characteristics of dry matter and crude protein, and a modified three-step *in vitro* method was used to determine the intestinal digestibility of rumen undegraded protein in DDGS with different degrees of heat processing, to analyze correlation and establish regression equations. The results showed as follows: 1) with increasing heating degree, the furosine and acid detergent insoluble protein contents in DDGS significantly increased ($P<0.05$), and the rumen degradation rate and intestinal digestibility of undegraded protein of dry matter and crude protein in DDGS significantly decreased ($P<0.05$). 2) Both furosine and acid detergent insoluble protein contents were significantly related to soluble fraction of dry matter and crude protein (r=-0.72 vs. -0.60; r=-0.60 vs. -0.51), undegradable fraction (r=0.96 vs. 0.84; r= 0.96 vs. 0.85), effective degradation rate (r=-0.62 vs. -0.51; r=-0.72 vs. -0.61) and intestinal digestibility of rumen undegradable protein (r=-0.52 vs. -0.57), and the correlation was significant ($P<0.05$). The prediction equations could be established by the regression. 3) Furosine content had a higher correlation with ruminal degradation characteristics than acid detergent insoluble protein content. Both had similar correlations with intestinal digestibility of rumen undegradable protein and total digestible proteins content, but furosine and small intestine digestible proteins had a higher correlation（r=0.67）. There is a correlation between furosine content and ruminal degradation characteristics and intestinal digestibility in different heat processing DDGS, and a regression equation can be established. Furosine content is more suitable than acid detergent insoluble protein content as a key indicator to evaluate the degree of heat processing.

Key words: furosine; rumen degradable characteristics; intestinal digestibility; DDGS; heat processing

*Corresponding author, professor, E-mail: zhangyonggen@sina.com （责任编辑　陈　鑫）